

# CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL DAB COM CÉLULA DE COMUTAÇÃO DE TRÊS ESTADOS PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

**Luan Carlos dos Santos Mazza** – luanmazza@ifce.edu.br

**Lucas Gomes de Sousa** – lucas.gsousa@hotmail.com

**Fábio José Lima Freire** – fabioifce@yahoo.com.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Departamento da Indústria

**Fernando Luiz Marcelo Antunes** – fantunes@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

**Resumo.** *O presente artigo realiza um estudo sobre o conversor CC-CC bidirecional Dual Active Bridge com Célula de Comutação de Três Estados para aplicação em sistemas fotovoltaicos com banco de baterias. Sendo mostrado o sistema proposto para aplicação, o princípio de funcionamento do conversor, a sua capacidade de carregar e descarregar um banco de baterias e outras características. Esse banco de baterias tem tensão nominal de 48 V e alimenta um barramento CC de 311 V com potência nominal de 2 kW. Nessa vertente são exploradas todas as regiões de operação do conversor e visto que o controle do fluxo de potência e da tensão na saída pode ser obtido por duas variáveis, o deslocamento de fase (phase-shift -  $\phi$ ) entre as tensões fundamentais das duas pontes e o ciclo de trabalho (D) dos interruptores de potência. Também são mostrados os resultados de resposta dinâmica nas três regiões do conversor, sendo possível verificar sua capacidade natural de se comportar como fonte de corrente na conexão ao barramento CC, sendo este último simulado como uma carga resistiva.*

**Palavras-chave:** *banco de baterias, bidirecional, dual active bridge, sistemas fotovoltaicos, phase-shift.*

## 1. INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento econômico da humanidade está intimamente ligado a enorme demanda de energia elétrica. Visto que diversos processos para funcionarem dependem do fornecimento de energia elétrica. Existem várias fontes de energia que podem ser convertidas em elétrica. Dentre elas, pode-se citar: as hidroelétricas, as termoeletricas, as nucleares e diversas outras. Mas tem-se em desenvolvimento tecnológico as Fontes Alternativas de Energia (FEA), com destaque para a conversão eólicoelétrica e a fotovoltaica.

A tecnologia envolvida nos sistemas fotovoltaicos está sendo bastante estudada, principalmente sistemas eletrônicos de processamento da potência. Destaque especial na conversão CC-CC bidirecional.

O conversor CC-CC bidirecional *Dual Active Bridge* (DAB) é muito atrativo por causa de suas características incluindo comutação suave, comutação sob tensão zero (ZVS – *Zero Voltage Switching*), fluxo de potência bidirecional, baixos esforços nos componentes e alta densidade de potência (De Doncker et al., 1991), (Kheraluwala et al., 1992), (Peng et al., 2004). Além disso, o DAB é amplamente aplicado em sistemas de distribuição de energia elétrica em CC (Kim et al., 2009), sistemas ininterruptos de potência (UPS – *Uninterruptible Power Supplies*), fluxo bidirecional entre sistemas de armazenamento de energia e sistemas de potência CC (Duarte et al., 2007), (Tao et al., 2008) e conversão de potência entre sistemas CA (Corrente Alternada) e sistemas CC (Corrente Contínua).

Diversas topologias de conversores CC-CC bidirecionais estão sendo propostas na literatura, tendo inclusive um estudo comparativo entre os conversores DAB monofásico e trifásico, conforme exposto em (Segaran et al., 2008). Além de topologias de conversores CC-CC bidirecionais para baixa potência (Jain et al., 2000). Sendo também propostas topologias para sistemas fotovoltaicos (Praça, 2011).

O conversor CC-CC bidirecional proposto neste artigo também pode ser aplicado em sistemas de eletrificação autônomos, visto que em sistemas fotovoltaicos que alimentam residências distantes da rede elétrica de fornecimento é indispensável à utilização de banco de baterias. Naturalmente o conversor pode funcionar integrando banco de baterias, o sistema fotovoltaico e cargas em CC ou algum inversor para alimentar cargas elétricas em CA.

O presente artigo tem os seguintes objetivos: mostrar uma nova topologia de conversor CC-CC bidirecional; apresentar as regiões de operação do conversor; realizar simulações em todas as regiões de operação, demonstrando a carga e a descarga do banco de baterias do sistema fotovoltaico proposto no trabalho e impor degraus de carga no barramento CC para verificar sua característica de fonte de corrente na saída do conversor.

## 2. SISTEMA FOTOVOLTAICO PROPOSTO

O sistema fotovoltaico proposto neste artigo está apresentado na Fig. 1. Percebe-se que o sistema tem basicamente os módulos fotovoltaicos e conversores CC-CC responsáveis por realizar o MPPT (*Maximum Power Point Tracking*),

ou seja, buscar através de algum algoritmo o ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos. As saídas desses conversores se conectam a um barramento CC de 311 V. Nesse barramento também está conectado cargas CC e um conversor CC-CA bidirecional responsável por interconectar o sistema à rede elétrica CA trifásica. Além disso, tem-se o controlador de carga bidirecional responsável por realizar a carga e a descarga do banco de baterias do sistema proposto (rede inteligente).

O controlador de carga bidirecional necessita manter o barramento CC com valor médio de tensão em 311 V, além de realizar o fluxo bidirecional de potência. Portanto tem-se uma visível necessidade de duas variáveis de controle para facilitar essas duas tarefas descritas, fluxo de potência bidirecional e tensão constante no barramento.

Para realizar tais tarefas, propõe-se uma topologia de conversor CC-CC inovadora neste artigo. Esse conversor apresenta características de DAB e a presença da célula de comutação de três estados, podendo assim realizar diversos estudos comparativos. Na próxima seção será apresentada a topologia do novo conversor proposto para realizar a função de controlador bidirecional de carga.

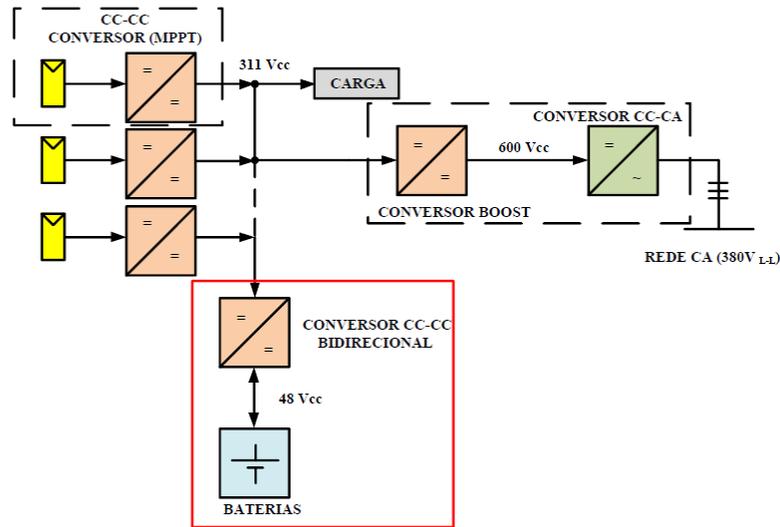


Figura 1 – Sistema fotovoltaico proposto.

Fonte: (Marques, 2012)

### 3. CONCEPÇÃO DA TOPOLOGIA DO CONVERSOR

O conversor CC-CC *Dual Active Bridge* (DAB) com Célula de Comutação de Três Estados (CCTE) é baseado em topologias bastante abordadas na literatura, o DAB mostrado na Fig. 2 e os conversores baseados na CCTE. O DAB foi proposto inicialmente por (De Doncker et al., 1991). Já a CCTE foi proposto inicialmente por (Bascope e Barbi, 2000).

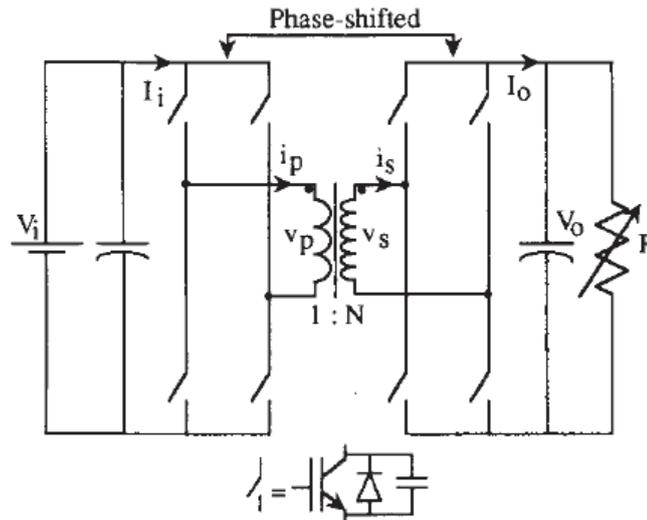


Figura 2 – Estágio de potência do conversor CC-CC bidirecional DAB.

Fonte: (Kheraluwala et al., 1992)

O fluxo de potência no conversor DAB é representado pela Eq. (1). Sendo  $V_1$  a tensão na porta 1,  $V_2$  a tensão na porta 2,  $X_L$  é a reatância indutiva,  $L$  é a indutância de dispersão referida ao primário,  $a$  é a relação de transformação e  $\phi$  é o ângulo de deslocamento (*phase-shift*) das tensões fundamentais da ponte do lado direito e do lado esquerdo. A Eq. (2) representa a reatância indutiva ( $X_L$ ) e o ganho estático do conversor ( $d$ ).

$$P = \frac{V_1^2}{X_L} d \varphi \left( 1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \quad (1)$$

Onde:

$$X_L = \omega L, \quad d = \frac{V_2}{aV_1} \quad (2)$$

O conversor proposto neste artigo apresenta oito chaves ativas ( $S_1 \dots S_8$ ), um indutor ( $L_1$ ), um transformador de quatro enrolamentos, sendo toda a indutância de dispersão representada como  $L_2$  e dois capacitores ( $C_1$  e  $C_2$ ). O conversor é multiporta. Ele apresenta três portas para processamento de potência elétrica.

A Fig. 3 mostra a estrutura topológica do conversor CC-CC DAB-CCTE, que consiste em um DAB, sendo que o primário é baseado na célula de comutação de três estados. Basicamente será utilizada apenas duas portas do conversor, a porta 1 (conectado ao banco de baterias) e a porta 3 (conectado ao barramento CC). Outra maneira de ligação pode ser colocando os mesmos elementos citados anteriormente nas portas 1 e 3, e na porta 2 insere-se painéis fotovoltaicos para injetar corrente no barramento CC ou no banco de baterias, mas esse estudo não está sendo realizado pelos autores neste trabalho.

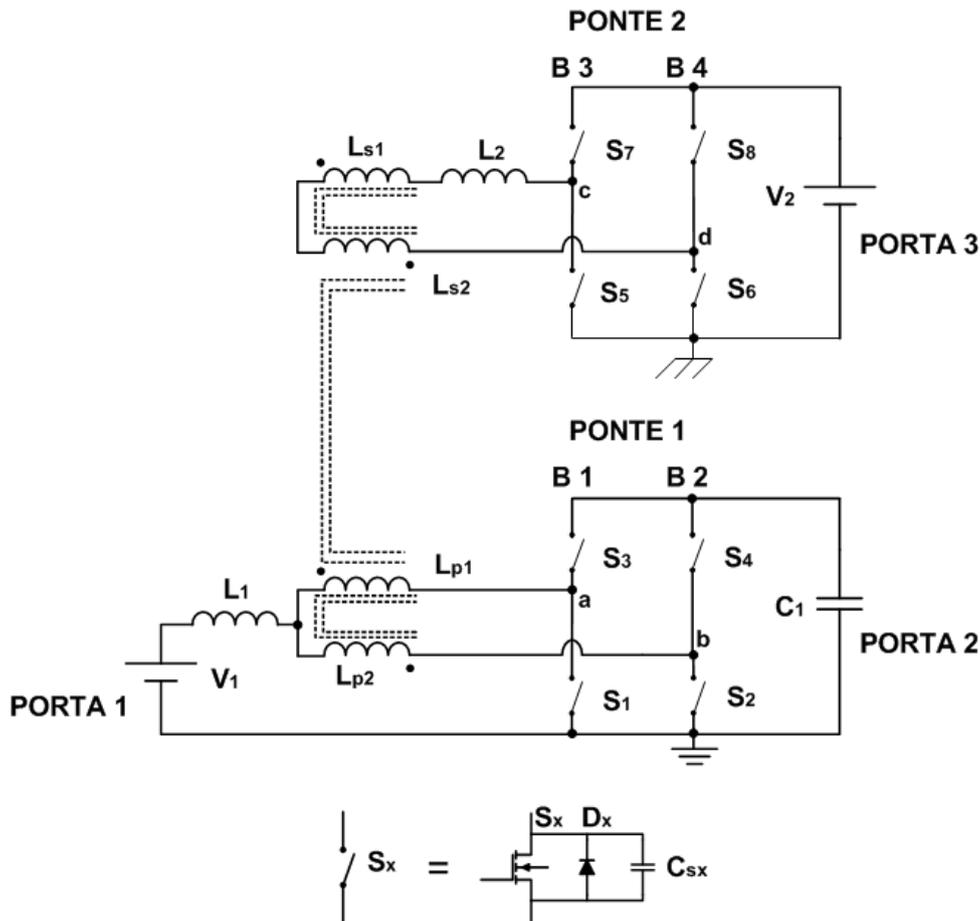


Figura 3 – Estágio de potência do conversor CC-CC bidirecional DAB-CCTE.

#### 4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR

O princípio de funcionamento do conversor proposto neste artigo é basicamente determinado por três regiões de operação, no qual estão listados na Tab. 1 e os respectivos intervalos em que o ciclo de trabalho está contido.

Tabela 1 – Regiões de operação do conversor DAB-CCTE

REGIÕES	CICLO DE TRABALHO (D)
R1	$D < 0,5$
R2	$D = 0,5$
R3	$D > 0,5$

O ângulo  $\varphi$  é o deslocamento de fase das fundamentais das tensões  $V_{ab}$  e  $V_{cd}$ , esses pontos estão representados na Fig. 3. Ele é responsável por determinar o fluxo de potência juntamente com o ciclo de trabalho (D) das chaves de

potência, num DAB com modulação convencional,  $D=0,5$ , o ângulo  $\varphi>0$  o fluxo de potência ocorre em um sentido e no caso de  $\varphi<0$  o fluxo de potência se inverte.

A modulação do conversor consiste em comutar os interruptores dos braços B 1 e B 2 defasados  $180^\circ$  na ponte 1 e também esse mesmo ângulo de defasagem para os braços B 3 e B 4 na ponte 2. Os interruptores inferiores desses braços são comutados com ciclo de trabalho D:  $S_1, S_2, S_5$  e  $S_6$ . Já os restantes dos interruptores superiores operam com modulação  $(1-D)$ . O deslocamento de fase (*phase shift*) é obtido através da defasagem entre os interruptores  $S_1$  e  $S_5$ . Na prática deve existir um tempo morto entre as chaves do mesmo braço para que não ocorra um curto-circuito.

## 5. PROJETO DO CONVERSOR

O conversor CC-CC DAB-CCTE é aplicado ao sistema proposto neste artigo. Basicamente os dados de projeto estão inseridos na Tab. 2.

Tabela 2 – Dados de projeto para aplicação do conversor proposto.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potência Nominal	2 kW
Tensão do Banco de Baterias (V1)	48 V
Tensão do Barramento CC (V2)	311 V

A relação de transformação do transformador de 4 enrolamentos é obtido buscando-se uma relação unitária entre a tensão  $V_{ab}'$ , que é a tensão  $V_{ab}$  refletida para o secundário e a tensão  $V_{cd}$ , que é a tensão no secundário do transformador após a indutância  $L_2$ . A Eq. (3) representa essa condição. Caso os valores dessa relação sejam diferentes da unidade, pode-se demonstrar que a potência reativa no transformador irá aumentar de forma alarmante, fazendo com que os valores de corrente nos interruptores sejam elevados. Isso pode acarretar danos permanentes aos interruptores, necessitando assim substituí-los.

$$\frac{V_{ab}'}{V_{cd}} = 1 \quad (3)$$

A tensão  $V_{ab}$  é obtida através da Eq. (4), onde se percebe que é igual a tensão no barramento do capacitor  $C_1$  e que depende do ciclo de trabalho D e da tensão na porta 1,  $V_1$ :

$$V_{ab} = V_{c1} = \frac{V_1}{1-D} \quad (4)$$

Logo, para refletir a tensão  $V_{ab}$  para o secundário obtém-se através da Eq. (5), em que a é a relação de transformação do transformador:

$$V_{ab}' = V_{ab} a = \frac{V_1}{1-D} a \quad (5)$$

Para o dimensionamento de todos os componentes do conversor é necessário de outras equações, sendo que por questões de síntese do artigo, são mostrados os valores já dimensionados e escolhidos em tabelas seguintes. Deve-se atentar que cada região de operação tem dados dos componentes diferenciados.

Com os dados da Tab. 2 foram calculados os componentes do conversor operando na região R1. A Tab. 3 apresenta os principais elementos do circuito de potência do conversor operando nessa região. Esta região é marcada por possuir  $D<0,5$ , isso acarreta características diferenciadas para os valores de tensão e corrente que o conversor está submetido.

Tabela 3 – Componentes do circuito de potência do conversor operando na região R1.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Indutor de entrada (L1)	50 $\mu$ H
Indutância de transmissão (L2)	96 $\mu$ H
Capacitores da porta 2 e 3 (C1 e C2)	680 $\mu$ F
Relação de Transformação (a)	3,9

A Tab. 4 apresenta os principais elementos do circuito de potência do conversor operando na região R2. Os dados da Tab. 2 também foram utilizados para o dimensionamento dos componentes do conversor. Nesta região R2 o ciclo de trabalho D é constante e seu valor é igual a 0,5.

Tabela 4 – Componentes do circuito de potência do conversor operando na região R2.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Indutor de entrada (L1)	150 $\mu$ H
Indutância de transmissão (L2)	116 $\mu$ H
Capacitores da porta 2 e 3 (C1 e C2)	680 $\mu$ F
Relação de Transformação (a)	3,2

Já a Tab. 5 apresenta os principais elementos do circuito de potência do conversor operando na região R3. Como realizado nas outras regiões, foram utilizados os dados da Tab. 2 para o dimensionamento do conversor.

Tabela 5 – Componentes do circuito de potência do conversor operando na região R3.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Indutor de entrada (L1)	186 $\mu$ H
Indutância de transmissão (L2)	138 $\mu$ H
Capacitores da porta 2 e 3 (C1 e C2)	680 $\mu$ F
Relação de Transformação (a)	2,6

Os interruptores de potência utilizados na ponte 1 do conversor são transistores do tipo MOSFET IRFP4668PbF e os dados principais são mostrados na Tab. 6.

Tabela 6 – Características do interruptor tipo MOSFET IRFP4668PbF, encapsulamento TO-247AC.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima tensão dreno-fonte $V_{DSS}$	200V
Máxima corrente de dreno $I_D$ @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	92A
Resistência dreno-fonte em condução $R_{DS(on)}$	9,7m $\Omega$
Tempo de subida $t_r$	105ns
Tempo de descida $t_f$	74ns

Os interruptores de potência utilizados na ponte 2 do conversor são transistores do tipo IGBT IRGP4062DPbF e os dados principais são mostrados na Tab. 7.

Tabela 7 – Características do interruptor tipo IGBT IRGP4062DPbF, encapsulamento TO-247AC.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima tensão coletor-emissor $V_{CES}$	600V
Máxima corrente de coletor $I_C$ @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	24A
Tensão de saturação coletor emissor $V_{CE(on)}$	1,65V
Tempo de subida $t_r$	24ns
Tempo de descida $t_f$	39ns

Os dados principais dos interruptores de potência são utilizados nas simulações. Esses dados tornam o conversor simulado mais real, demonstrando que na prática deve-se atentar para as perdas desses interruptores. Optou-se por escolher transistores do tipo MOSFET na ponte 1, mas na ponte 2 outro tipo de transistor. Isso é decorrente do fato de que quanto maior a tensão máxima dreno fonte, maior será a resistência dreno-fonte em condução  $R_{DS(on)}$ , e isso leva a maiores perdas nos interruptores. Portanto na ponte 2 optou-se por interruptores do tipo IGBT, onde as perdas por condução são menores, mesmo para tensões altas em relação ao MOSFET.

## 6. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados de simulação com o conversor operando nas regiões R1, R2 e R3. Na figura 4 é mostrado o circuito utilizado para simulação no programa computacional PSIM<sup>®</sup>. Todos os principais dados de simulação estão demonstrados no texto. Sendo expostos os resultados para descarga do banco de baterias e posteriormente para carga das células de baterias.

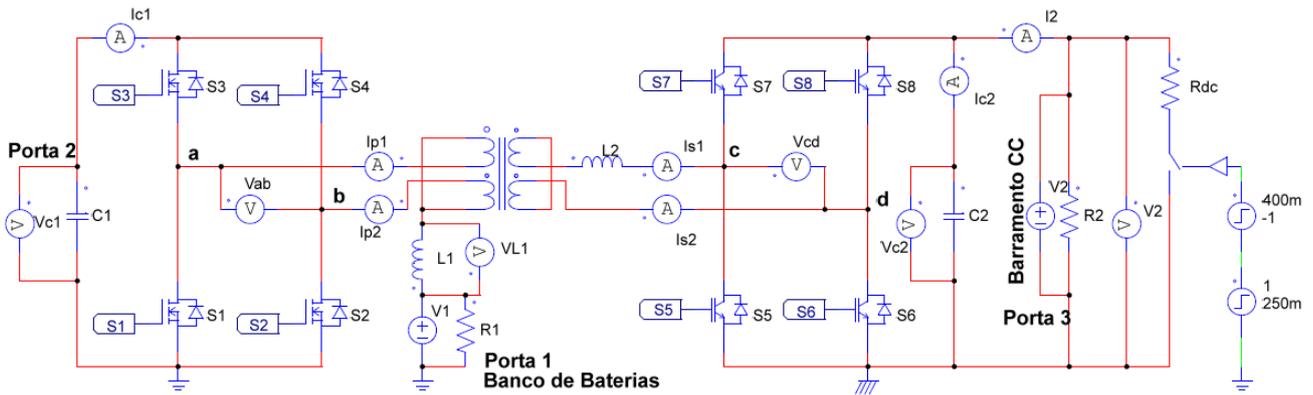


Figura 4 – Estágio de potência do conversor CC-CC bidirecional DAB-CCTE para simulação no PSIM®.

### 6.1 Resultados de simulação para região R1

Nas subseções seguintes serão mostradas as principais formas de onda para o conversor operando na região R1, ou seja, com ciclo de trabalho  $D < 0,5$ . Sendo que na simulação em malha aberta foi utilizado  $D = 0,4$  e  $\phi = 20^\circ$ .

#### 6.1.1 Modo descarga do banco de baterias

A Fig. 5 apresenta as principais formas de onda obtidas no conversor para o modo de descarga do banco de baterias com o conversor operando na região R1. Percebe-se que na Fig. 5 (a) é mostrada a tensão de saída no barramento CC no momento em que o banco de baterias está se descarregando, mostrando inclusive uma ondulação presente nesta onda, com valor aproximado de 0,08 V, ou seja, um valor desprezível em relação ao valor médio desejado que é de 311 V. Na Fig. 5 (b) é mostrada a corrente no barramento CC com valor médio de 6,42A. Já a Fig. 5(c) mostra a corrente no banco de baterias.

A corrente no barramento CC tem uma ondulação desprezível em relação à corrente nominal esperada de 6,43A. É notória a baixa ondulação de corrente e de tensão no barramento CC. Já é nítido também que a ondulação da corrente de entrada no banco de baterias é bastante reduzida, sendo no valor de 7,2 % da corrente esperada de 41,66A.

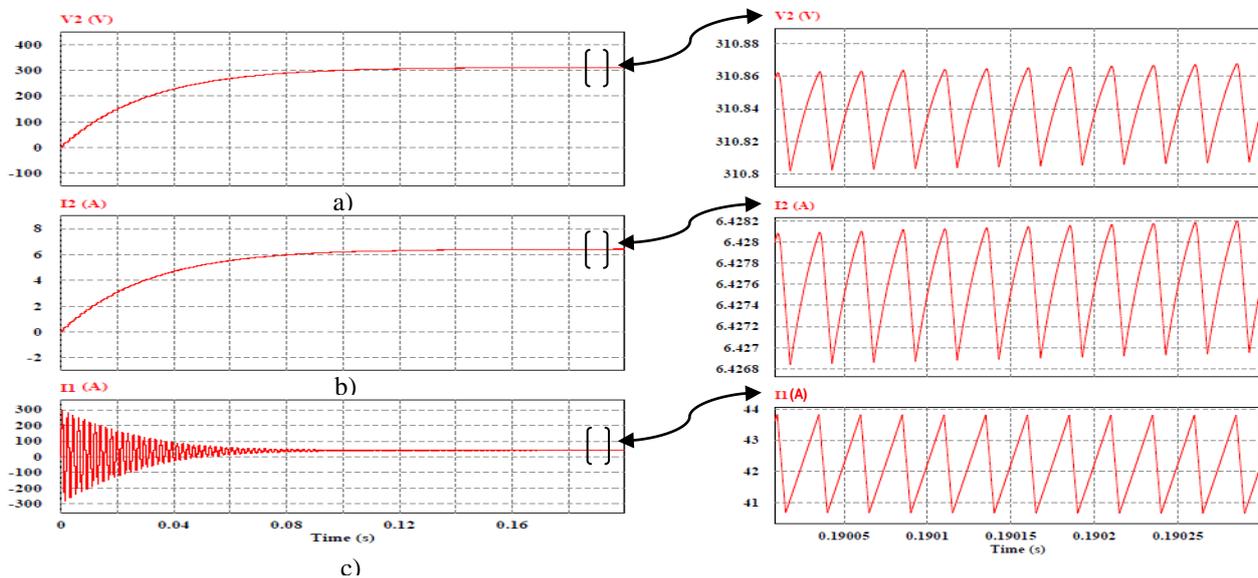


Figura 5 – Formas de onda do conversor CC-CC DAB-CCTE na descarga do banco de baterias operando na região R1: a) tensão no barramento CC; b) corrente no barramento CC; c) corrente no banco de baterias;

#### 6.1.2 Modo descarga do banco de baterias – degrau de carga

A Fig. 6 apresenta as formas de onda obtidas no conversor para o modo de descarga do banco de baterias com o conversor operando na região R1 com um degrau de carga de 50%. A Fig. 6 (a) mostra que a tensão na saída diminui drasticamente para aproximadamente 161V no instante  $t = 250\text{ms}$ , no instante do degrau de 100% para 50%, e só retorna em  $t = 400\text{ms}$  após o degrau de carga de 50% para 100%. Já a Fig. 6 (b) mostra que mesmo após o degrau de carga, a corrente tende a retornar para um valor de 6,7A. Esse valor é próximo ao valor nominal após o transitório e também no retorno da carga original, comportando-se assim como fonte de corrente.

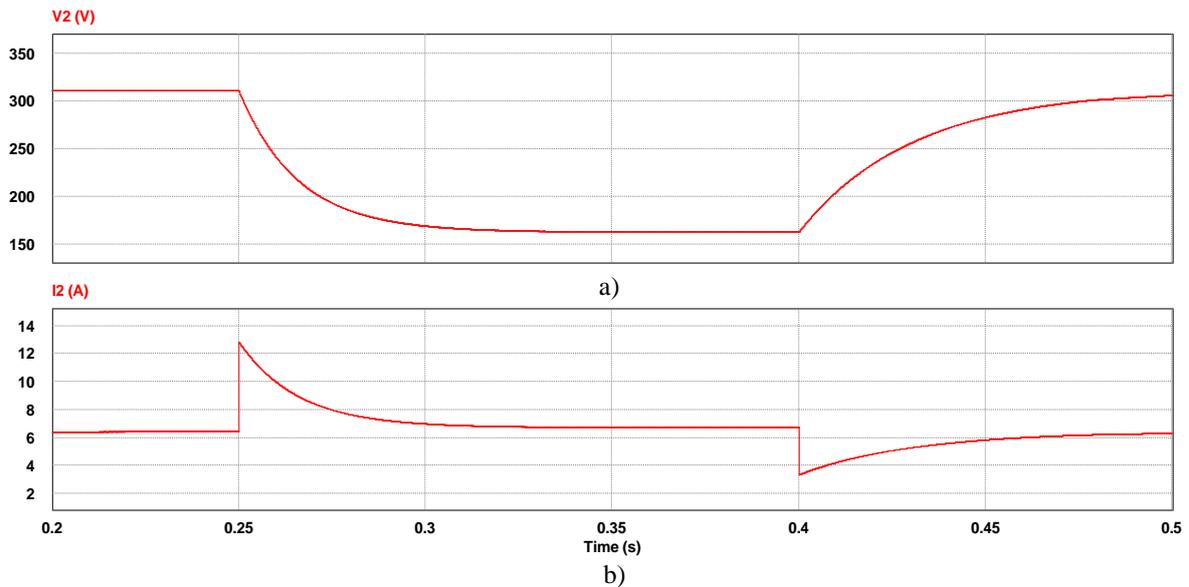


Figura 6 – Formas de onda obtidas na simulação do conversor CC-CC bidirecional DAB-CCTE no PSIM® na descarga do banco de baterias alimentando uma carga puramente resistiva operando na região R1 com degrau de carga: a) tensão no barramento CC; b) corrente no barramento CC.

## 6.2 Resultados de simulação para região R2

Nas subseções seguintes serão mostradas as principais formas de onda para o conversor operando na região R2, ou seja, com ciclo de trabalho  $D=0,5$ . Sendo que na simulação em malha aberta para o degrau de carga foi utilizado  $\phi=20^\circ$  e para o modo carga do banco de baterias foi utilizado  $\phi=-20^\circ$ .

### 6.2.1 Modo descarga do banco de baterias – degrau de carga

A Fig. 7 apresenta as formas de onda obtidas no conversor para o modo de descarga do banco de baterias com o conversor operando na região R1 com um degrau de carga de 50%. A Fig. 7 (a) mostra que a tensão na saída cai drasticamente para aproximadamente 165V no instante  $t=250\text{ms}$ , no instante do degrau de 100% para 50%, e só retorna em  $t=400\text{ms}$  após o degrau de carga de 50% para 100%. Já a Fig. 7 (b) mostra que mesmo após o degrau de carga, a corrente tende a retornar para 6,8A, no qual é um valor próximo ao nominal. No retorno da carga original, a corrente tende a estabilizar-se. O comportamento apresentado nesta subseção é semelhante aos degraus de carga nas outras regiões de operação. Percebem-se pequenas diferenças nos valores instantâneos de tensão e corrente no intervalo de ocorrência do degrau de carga.

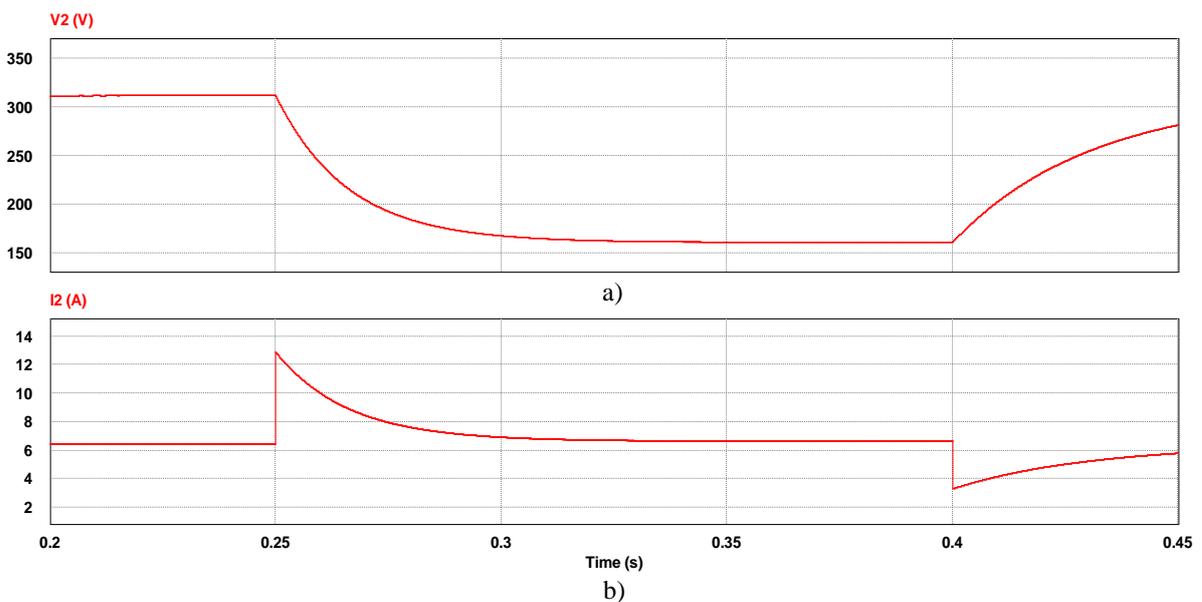


Figura 7 – Formas de onda do conversor CC-CC bidirecional DAB-CCTE na descarga do banco de baterias operando na região R2 com degrau de carga: a) tensão no barramento CC; b) corrente no barramento CC.

### 6.2.2 Modo carga do banco de baterias

Nas Fig. 8 (a) e (b) são apresentadas as formas de onda do conversor carregando o banco de baterias, onde se percebe que a corrente se inverteu de sentido tanto no barramento CC como no banco de baterias. O valor médio da corrente no barramento CC é de 6,8A. Já no banco de baterias o valor médio da corrente é de 43,51A.

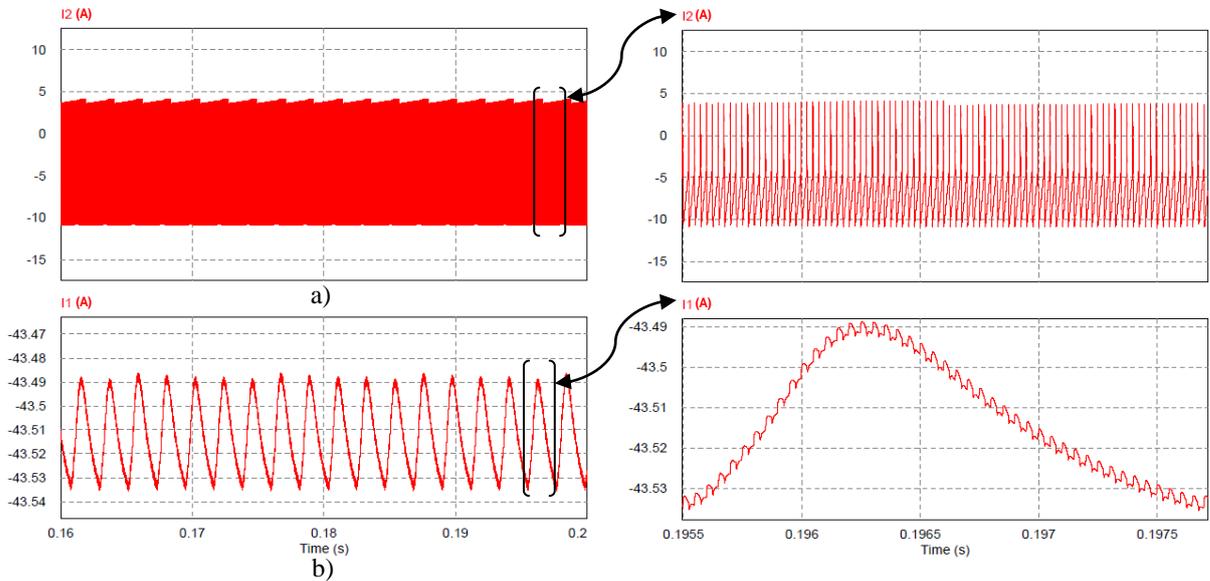


Figura 8 – Formas de onda do conversor CC-CC bidirecional DAB-CCTE na carga do banco de baterias operando na região R2: a) corrente no barramento CC; b) corrente no banco de baterias.

### 6.3 Resultados de simulação para região R3

Nas subseções seguintes serão mostradas as principais formas de onda para o conversor operando na região R3, ou seja, com ciclo de trabalho  $D > 0,5$ . Com isso, na simulação em malha aberta para o degrau de carga foi utilizado  $\phi = 30^\circ$  e para o modo carga do banco de baterias foi utilizado  $\phi = -30^\circ$ . O ciclo de trabalho utilizado foi de  $D = 0,6$ .

#### 6.3.1 Modo descarga do banco de baterias – degrau de carga

A Fig. 9 apresenta as formas de onda obtidas no conversor para o modo de descarga do banco de baterias com o conversor operando na região R1 com um degrau de carga de 50%. A Fig. 6 (a) mostra que a tensão na saída diminui para aproximadamente 156V no instante  $t = 250\text{ms}$ , no instante do degrau de 100% para 50%, e só retorna em  $t = 400\text{ms}$  após o degrau de carga de 50% para 100%. Já a Fig. 9 (b) mostra que após o degrau de carga, a corrente tende a retornar para um valor médio de 6,6A, bastante próximo do valor nominal anterior ao transitório. Quando o degrau de carga ocorre de 50% para 100% da carga os valores de tensão e corrente tendem aos seus valores nominais. Deve-se atentar para a semelhança da resposta dinâmica do conversor, mesmo para ciclos de trabalhos (D) diferentes, ou seja, para regiões de operação diferentes.

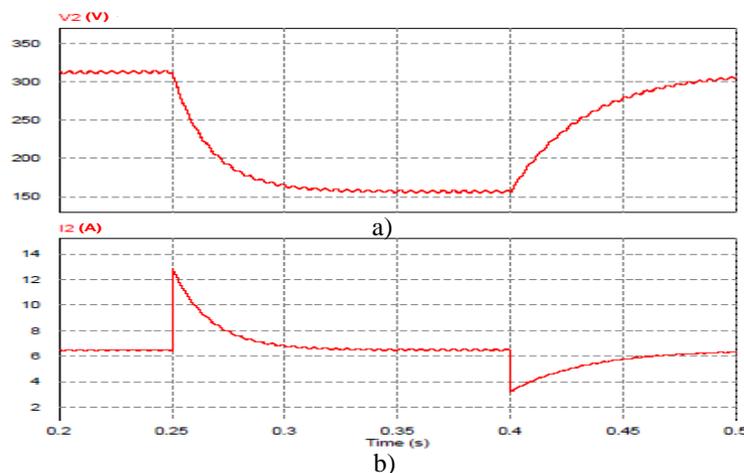


Figura 9 – Formas de onda do conversor CC-CC bidirecional DAB-CCTE na descarga do banco de baterias operando na região R2 com degrau de carga: a) tensão no barramento CC; b) corrente no barramento CC.

### 6.3.2 Modo carga do banco de baterias

Nas Fig. 10 (a) e (b) são apresentadas as formas de onda do conversor carregando o banco de baterias, onde se percebe que a corrente se inverteu de sentido tanto no barramento CC como no banco de baterias. O valor médio da corrente no barramento CC,  $I_2$ , é aproximadamente de 6,8A e o valor médio da corrente no banco de baterias,  $I_1$ , é de 42A.

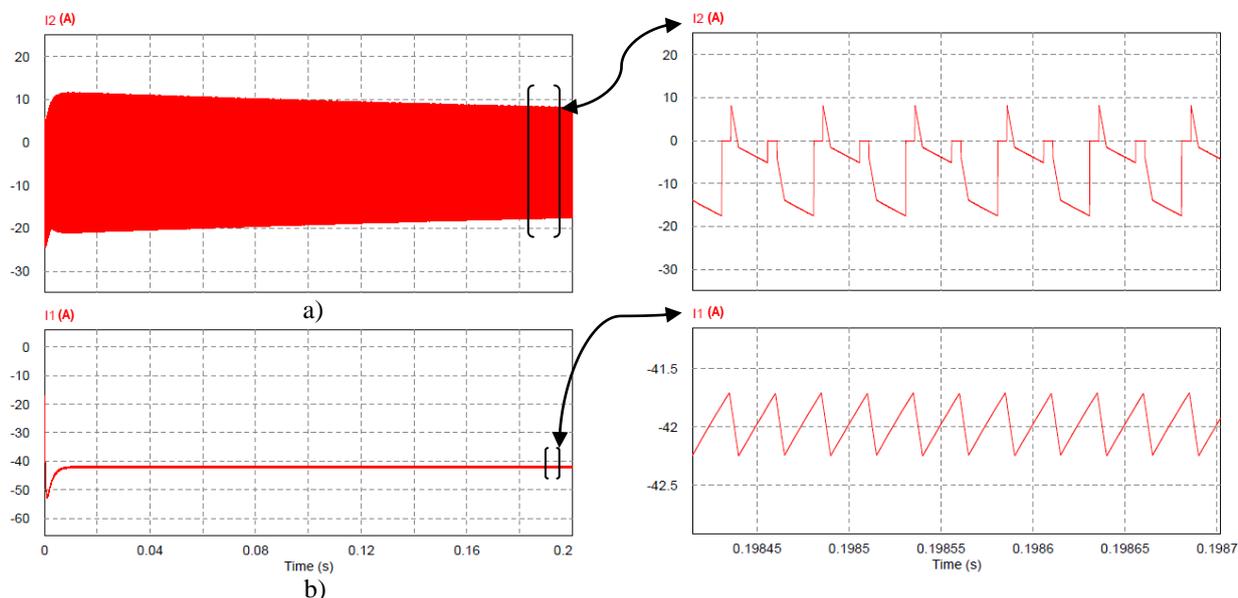


Figura 10 – Formas de onda do conversor CC-CC bidirecional DAB-CCTE na carga do banco de baterias operando na região R3: a) corrente no barramento CC; b) corrente no banco de baterias.

## 7. CONCLUSÕES

O conversor CC-CC bidirecional DAB-CCTE foi apresentado neste artigo. Todas as regiões de operação foram mostradas em simulações para comprovar sua aplicabilidade em sistemas fotovoltaicos com banco de baterias, sendo essa necessidade presente em localidades distantes dos sistemas de distribuição, portanto é uma solução para esse fim.

Outra característica marcante desse conversor é seu comportamento como fonte de corrente na saída, pois mesmo em malha aberta quando o conversor era submetido a um degrau de carga, a corrente retornava a um valor próximo ao nominal após os transitórios. As respostas dinâmicas das três regiões de operação do conversor são semelhantes para o sistema simulado com potência nominal.

Portanto conclui-se que a topologia proposta é aplicável em sistemas fotovoltaicos com banco de baterias, onde se necessita carga ou descarga do banco de baterias. Outra alternativa pode ser a utilização da terceira porta do conversor para injeção de corrente de algum sistema fotovoltaico existente.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – UFC e GPEC pelo espaço e material disponibilizado.

### REFERÊNCIAS

- Bascope, G. V. T., Barbi, I., 2000. Generation of a Family of Non-Isolated DC-DC PWM Converters Using New Three-State Switching Cells, PESC' 00 - IEEE Power Electronic Specialists Conference, Galway, Irlanda.
- De Doncker, R.W., Divan, D.M., Kheraluwala, M. H., 1991. A three-phase soft-switched high power density DC/DC converter for high power applications, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 27, n. 1, pp. 63-73.
- Duarte, J. L., Hendrix, M., Simoes, M. G., 2007. Three-port bidirectional converter for hybrid fuel cell systems, IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, n. 2, pp. 480-487.
- Jain, M., Daniele, M., Jain, P. K., 2000. A bidirectional dc-dc converter topology for low power application, IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, n. 4, pp. 595-606.
- Kheraluwala, M. H., Gascoigne, R. W., Divan, D. M., Baumann, E. D., 1992. Performance characterization of a high-power dual active bridge dc-to-dc converter, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, n. 6, pp. 1294-1301.
- Kim, J., Jeong, I., Nam, K., 2009. Asymmetric duty control of the dual-active-bridge DC/DC converter for single-phase distributed generators, ECCE - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, EUA.

- Marques, D. D., 2012. Conversor CC-CC Bidirecional de Alto Ganho para Aplicação em Pequenos Sistemas de Geração de Energia Elétrica, Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza.
- Peng, F. Z., Li, H., Su, G. J., Lawler, J. S., 2004. A New ZVS Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell and Battery Application, IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, n. 1, pp. 54-65.
- Praca, P. P., 2011. Conversores de Alto Ganho de Tensão e Estágio Único, Aplicados a Sistemas de Energias Renováveis com Baterias, Tese de Doutorado, UFC, Fortaleza.
- Segaran, D., Holmes, D. G., McGrath, B. P., 2008. Comparative Analysis of Single and Three-phase Dual Active Bridge Bidirectional DC-DC Converters, AUPEC'08 – IEEE Australasian Universities Power Engineering Conference, Sydney, Austrália.
- Tao, H. M., Kotsopoulos, A., Duarte, J. L., Hendrix, M. A. M., 2008. Transformer-coupled multiport ZVS bidirectional dc-dc converter with wide input range, IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, n. 2, pp. 771–781.

### **BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER DAB WITH THREE-STATE SWITCHING CELL FOR APPLICATION IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

**Abstract.** *This article presents a study of a bidirectional DC-DC converter with Dual Active Bridge with Three-State Switching Cell for application in photovoltaic systems with battery bank. It is shown the application of the proposed system, the operating principle of the converter and its ability of charging and discharging a battery bank and other characteristics. This bank battery has a nominal voltage 48 V and feeds a 311 V DC bus with rated power 2 kW. It is explored all operation regions of the drive and, since the power flow and output voltage control can be realized by two variables, the phase shift (phase-shift -  $\phi$ ) between the fundamental tensions of the two bridges and the power switches duty cycle ( $D$ ). The results of dynamic response in the three regions of the converter is also shown, as well as its natural ability to behave as a current source connected to the DC bus, the latter being simulated as a resistive load.*

**Key words:** *battery bank, bidirectional, dual active bridge, photovoltaic systems, phase-shift.*